



Effet de la vitesse sur l'asymétrie du cheval

J. Parmentier¹, A. Schmutz^{2, 3, 4}, M. Sapone^{2, 5}, K. Ben Mansour⁵, F. Marin⁵, P. Martin², H. Chateau¹

¹ CWD-VetLab, UMC 957 Biomécanique et Pathologie Locomotrice du Cheval (BPLC), Ecole nationale vétérinaire d'Alfort, F-94704, Maisons-Alfort, France

² CWD-VetLab, Lim France, 24360, Nontron, France

³ EA3038 Entrepôts, Représentation et Ingénierie des Connaissances (ERIC), Université de Lyon, Lyon 2, 69676, Bron, France

⁴ UMR T9406 Laboratoire de Biomécanique et Mécanique des Chocs (LBMC), Université de Lyon, Lyon 1, F-69675, Bron, France

⁵ UMR CNRS 7338, Biomécanique et Bioingénierie, Sorbonne Universités, Université de Technologie de Compiègne, 60203, Compiègne, France

jeanne.parmentier@vet-alfort.fr



Ce qu'il faut retenir

Cette présentation porte sur l'effet de la vitesse sur l'asymétrie du cheval. Les points à retenir sont :

- Outil développé pour les **vétérinaires**
- Mesure à l'aide de **7 capteurs inertiels** : tête, garrot, croupe, 4 membres
- **5 chevaux** au **trot** sur **tapis roulant**, à **2 vitesses** : 4m/s et 6m/s
- **Paramètres mesurés** pour chaque foulée : différences de minima et de maxima des déplacements verticaux, divers indices de symétrie
- **Résultats** : effet significatif de la vitesse sur la plupart des paramètres mesurés pour les chevaux de l'étude
- **Conséquences et applications** : Pour comparer l'évolution d'une asymétrie locomotrice (entre 2 conditions et/ou au cours du temps), il est important de standardiser la vitesse du cheval. L'étude montre un effet significatif de la vitesse pour la majorité des paramètres mesurés pour nos 5 chevaux. Si l'effet significatif est généralisé après une seconde étude, les systèmes de quantification de boiterie devront être capables de fournir la vitesse pour plus de fiabilité dans l'interprétation des mesures de l'asymétrie.

Résumé

Lorsqu'un cheval présente une baisse de performance, une gêne ou une boiterie, il est présenté à un vétérinaire pour un examen locomoteur. Ce dernier va observer le cheval se déplacer en ligne droite et en cercle, sur sol dur ou mou et au trot. Il peut aussi effectuer différents tests (test de flexion, anesthésies diagnostiques...) pour observer une différence de locomotion. Son diagnostic est donc basé sur ses observations et son interprétation des réactions du cheval ainsi que son expérience.

Afin d'apporter des informations objectives sur l'asymétrie du cheval lors d'un examen locomoteur effectué par un vétérinaire, un outil composé de 7 capteurs inertiels a été développé. Pour interpréter les résultats obtenus, il est important de prendre en compte différents paramètres influençant la locomotion du cheval, notamment sa vitesse. Notre étude préliminaire montre que sur certains chevaux, les paramètres mesurés peuvent être significativement influencés par la vitesse. Une seconde étude devra être réalisée pour pouvoir généraliser ce résultat. Si l'effet de la vitesse est confirmé, il faudra que le praticien en tienne compte dans l'établissement de son diagnostic et que le cheval soit mené à la même vitesse entre les différents examens.

1 Contexte et objectifs

La boiterie représente une des principales causes de consultation vétérinaire pour le cheval et une des premières causes de mise en retraite prématurée du cheval de sport. L'évaluation de la boiterie se fait traditionnellement par l'observation du cheval en mouvement par un praticien vétérinaire. Lors de ces examens, le cheval est mené en main sur sol dur au pas et au trot, en ligne droite et sur cercle. Le cheval est aussi mené aux trois allures en cercle sur sol mou.

Le praticien observe les longueurs de foulée et les durées de phase d'appui pour chaque membre ainsi que leurs amplitudes de mouvement et la présence d'éventuelles asymétries, notamment dans les mouvements verticaux de la tête et de la croupe qui peuvent être des signes de boiterie antérieure et postérieure respectivement.

En fonction des résultats de leurs observations, le vétérinaire peut effectuer des flexions dynamiques (Figure 1, droite) qui consistent à garder le membre du cheval en flexion pendant 1mn avant de le faire trotter en ligne droite sur sol dur. En comparant la locomotion du cheval avant et après la flexion, il peut considérer le test positif (changement de locomotion) ou négatif (pas de changement significatif). De la même façon, des anesthésies diagnostiques peuvent être pratiquées pour localiser la zone douloureuse. Elles consistent en l'injection locale d'un produit anesthésiant qui bloque les sensations dans la zone visée. Une fois l'effet obtenu, le cheval de nouveau examiné et sa locomotion est comparée à la situation avant l'anesthésie.

Après chaque examen, le praticien donne un grade à la boiterie observée selon une échelle de gradation de la boiterie, allant de 0 à 4, définie par l'American Association of Equine Practitioners (AAEP, 1991). Une échelle plus récente a été proposée par Weishaupt *et al.* (2001), gradant la boiterie de 0 à 5. Pour les deux échelles, 0 décrit une locomotion normale, tandis que 4 et 5, représentent l'absence d'appui sur le membre affecté.

Figure 1 : échelle de gradation de la boiterie proposée par Weishaupt *et al.* 2001 (gauche) et test de flexion de l'antérieur droit (droite).

Degré	Définition
0/5	Normal
1/5	Absence d'irrégularité au pas ; légères irrégularité au trot, non visible sur toutes les foulées
2/5	Absence d'irrégularité au pas ; boiterie modérée au trot
3/4	Légère irrégularité au pas ; boiterie modérée au trot
4/5	Boiterie modérée au pas ; boiterie sévère au trot
5/5	Suppression d'appui sur le membre affecté



Ces observations restent subjectives et le vétérinaire peut avoir du mal à quantifier les différences de locomotion d'un test à l'autre ou d'une visite à l'autre dans le cadre d'un suivi longitudinal. Afin d'apporter une quantification objective de la locomotion du cheval et plus particulièrement de la boiterie, l'équipe du CWD-VetLab a développé un outil composé de capteurs communiquant sans fil entre eux et avec un ordinateur, permettant la mesure de différents paramètres de la locomotion. Cet outil peut être utilisé dans le cadre d'examen cliniques d'évaluation de la boiterie des chevaux mais aussi pour des projets de recherche sur tapis roulant permettant de contrôler la vitesse du cheval (Figure 2). Une des premières observations lors des mesures sur tapis roulant est que la locomotion du cheval au trot varie en fonction de la vitesse. Bien que ce fait soit connu, l'effet de la vitesse sur les différents indices d'asymétrie mesurés par les systèmes actuellement développés n'a pas été évalué. Nous nous sommes donc interrogés sur l'effet qu'a la vitesse sur les différents paramètres liés à l'asymétrie que nous mesurons.

En effet, lors d'un examen locomoteur classique, la vitesse du cheval peut varier d'une condition à l'autre et d'un jour de mesure à l'autre. Il est donc important d'en tenir compte lors de la comparaison des résultats calculés à différents moments.

L'effet de la vitesse du cheval sur sa locomotion au trot a déjà été évalué lors du travail monté (Clayton *et al.*, 1994) ou mené en main (Galisteo *et al.*, 1998) pour la longueur de foulée, les ratios appui/foulée ou les amplitudes articulaires mais pour des vitesses non contrôlées et avec des méthodes de mesures vidéographiques ou optoélectroniques. Les effets du type de déplacement (ligne droite ou cercle) et de l'angle d'inclinaison du cheval sur les paramètres de la symétrie a été mesuré avec un système de capteurs similaire à celui utilisé dans cette étude (Pfau *et al.*, 2012, Walker *et al.*, 2010). Cependant, l'effet de la vitesse sur les

paramètres présentés ici n'a pas été mentionné et s'il s'avère être non-nul, il est important de le connaître pour pouvoir les interpréter correctement et éventuellement les normaliser.

Figure 2 : utilisation du système en examen clinique (gauche) et en projet de recherche sur tapis roulant (droite) avec système de capture de mouvement 3D optoélectronique



2 Méthode

2.1 Matériels

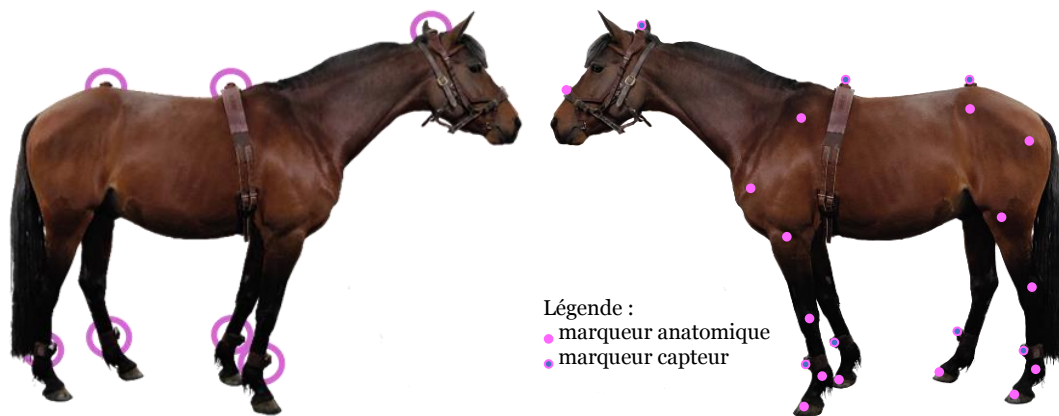
Cinq chevaux ont été utilisés pour cette étude. Ils ont été préalablement habitués à monter et trotter sur tapis roulant à différentes vitesses. Différents paramètres ont été mesurés grâce à 7 capteurs inertiels (IMU pour Inertial Measurement Unit), composés chacun d'un accéléromètre tri-axes ($\pm 16g$, soit $\pm 156,96m/s^2$) et un gyroscope tri-axes ($\pm 2000^\circ/s$). Les accélérations et les vitesses de rotation étaient donc mesurées dans les trois dimensions. Les capteurs étaient positionnés sur les chevaux au niveau de la tête, du garrot, de la croupe et sur la face avant des 4 canons. Les signaux enregistrés par les capteurs ont été transmis sans-fil à un ordinateur à proximité. La fréquence d'échantillonnage était de 500Hz, soit 500 mesures par seconde.

Le matériel de fixation des capteurs a été développé spécialement par le CWD-VetLab et comporte un licol type Micklem, un surfaix élastique, une pochette de fixation pour la croupe et 4 bracelets pour les membres (Figure 3, gauche). Afin de ne pas interférer avec les signaux mesurés au niveau de la tête, les chevaux étaient tenus en longe fixée sur un licol classique.

Les chevaux ont aussi été équipés de marqueurs réfléchissants collés avec de l'adhésif double-face sur des reliefs anatomiques standardisés ainsi que sur les capteurs (Figure 3, droite). Grâce à un système de capture de mouvement 3D optoélectronique Vicon (MoCap), composé de 18 caméras infrarouges, les trajectoires de chaque marqueur ont été suivies lors du mouvement du cheval. Ce type de système est considéré comme le système de référence en analyse de mouvement et il nous sert donc de validation des mesures obtenues avec les capteurs IMUs.

Chaque cheval était d'abord échauffé au pas sur le tapis roulant puis effectuait 3 passages au trot à 4m/s puis 3 passages au trot à 6m/s. Les données étaient enregistrées pendant 20s une fois la vitesse du cheval stabilisée.

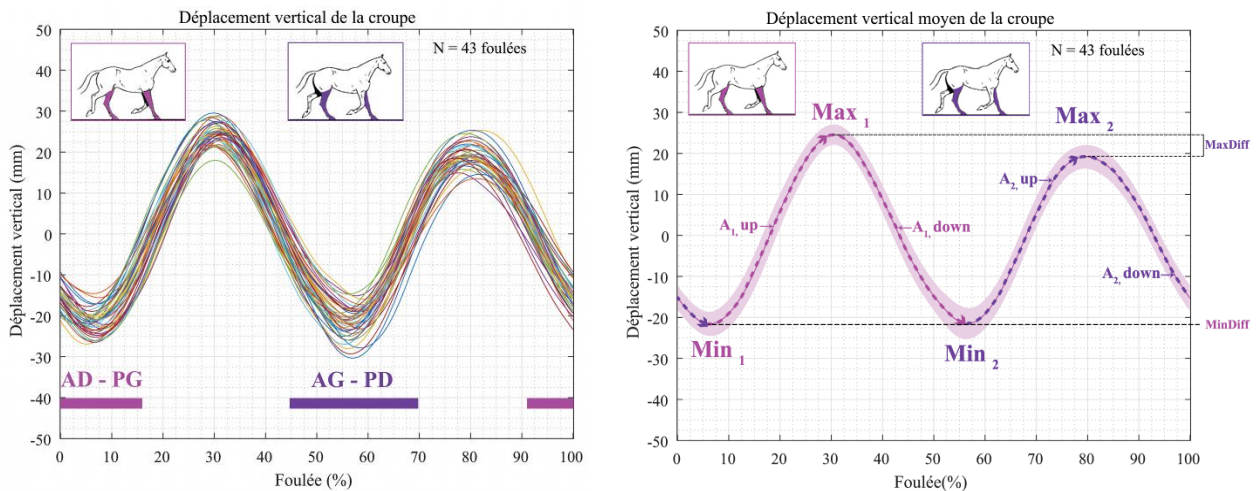
Figure 3 : cheval portant le matériel utilisé dans l'étude, les cercles montrent l'emplacement des capteurs (gauche) ; Représentation de l'emplacement des marqueurs d'intérêt pour la capture de mouvement 3D optique (droite)



2.2 Paramètres mesurés

Les signaux ont été découpés en foulées, une foulée étant définie comme le mouvement entre deux impacts successifs de l'antérieur droit avec le sol. Pour chaque foulée, le signal d'accélération verticale de la tête, du garrot et de la croupe ont été intégrés deux fois afin d'obtenir le déplacement vertical (Figure 4). Lors d'une foulée de trot d'un cheval sain, les déplacements verticaux de la tête, du garrot et de la croupe présentent deux élévations et deux abaissements de même amplitude, présentant une courbe sinusoïdale parfaite. Un cheval boiteux présente des différences d'élévation et d'abaissement entre le poser du membre sain et celui du membre douloureux. Ce sont ces différences que nous souhaitons quantifier en fonction de la vitesse du cheval.

Figure 4 : foulées extraites à partir du poser du diagonal droit, une courbe représente une foulée (gauche) ; définition des paramètres extraits (MinDiff, MaxDiff, $A_{1/2,up/down}$ utilisés pour les $SI_{up/down}$. Sur cet exemple, MinDiff = 0 et MaxDiff > 0 (droite)



A partir de ces signaux de déplacements verticaux, les paramètres suivants ont été calculés :

- **ERz** (sans dimension) : indice de symétrie défini par Audigié *et al.* (2002) à partir des coefficients de Fourier décrivant les courbes de déplacement vertical
- **MinDiff** (%) : différence entre les minima verticaux, normalisée par l'amplitude de mouvement
- **MaxDiff** (%) : différence entre les maxima verticaux, normalisée par l'amplitude de mouvement
- **SI_{up}** (%) : indice de symétrie du mouvement ascendant, traduisant la symétrie du cheval dans la phase de propulsion de la foulée

- **SI_{down}** (%) : indice de symétrie du mouvement descendant, traduisant la symétrie du cheval dans la phase d'amortissement de la foulée

ERz s'exprime tel que :

$$ERz = \frac{Ampl_2^2}{Ampl_1^2 + Ampl_2^2} * 100$$

où $Ampl_1$ et $Ampl_2$ sont les amplitudes des 1^{ère} et 2^e harmoniques de l'analyse de Fourier de la foulée.

SI_{up/down} s'exprime tel que :

$$SI_{up/down} = \frac{A_{1,up/down} - A_{2,up/down}}{\max(A_{1,up/down}, A_{2,up/down})} * 100$$

où $A_{1up/down}$ et $A_{2up/down}$ sont graphiquement représentés sur la Figure 4.

Chacun de ces paramètres est calculé pour la tête, le garrot et la croupe, et ils traduisent ce que les vétérinaires cherchent à observer lors d'un examen locomoteur. En parallèle, la fréquence, longueur et la durée de foulée ont été calculés pour chaque membre.

2.3 Effet de la vitesse : analyse statistique

Afin d'étudier l'effet de la vitesse du cheval sur les paramètres mesurés, une base de données a été créée à partir des foulées mesurées pour chaque cheval. La base de données est constituée de 1 colonne par paramètre mesuré et une ligne par foulée d'un cheval, soit 14 colonnes et 824 lignes. La normalité et l'homogénéité des données ont été testées avec un test de Shapiro-Wilk et un test de Bartlett respectivement. Si la normalité et/ou l'homogénéité ne sont pas vérifiées, un test de Kruskal-Wallis est appliqué, sinon une ANOVA est réalisée.

L'ANOVA permet de tester l'effet des facteurs *Vitesse*, *Cheval* et l'interaction *Vitesse-Cheval*, avec un seuil de significativité choisi de 0,05 pour les 5 chevaux mesurés. Les hypothèses testées sont :

- 1) Il y a des différences de valeurs entre les paramètres mesurés à 4m/s et ceux mesurés à 6m/s, tous chevaux confondus (effet *Vitesse*).
- 2) Il y a des différences de valeurs entre les paramètres de chaque chevaux, toutes vitesses confondues (effet *Cheval*)
- 3) Il y a des différences de valeurs pour les paramètres en fonction du cheval et de la vitesse (interaction *Cheval - Vitesse*)

3 Résultats

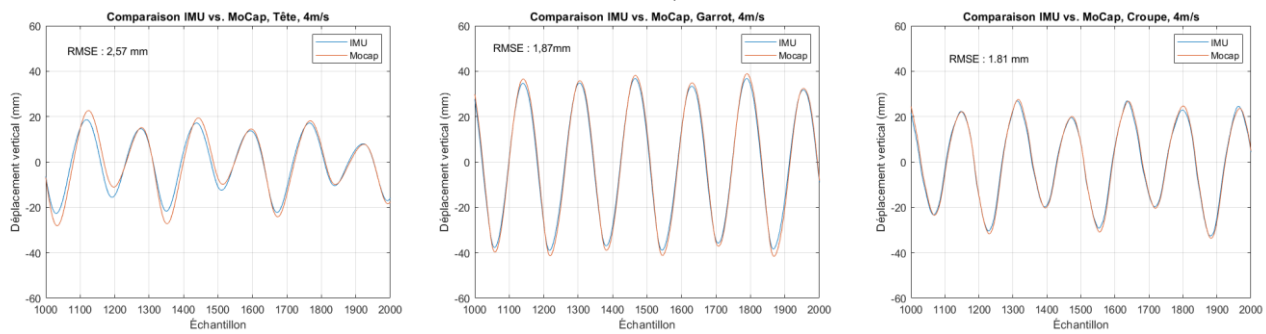
Les résultats suivant sont découpés en deux parties. La première présente la comparaison entre les signaux de déplacements verticaux mesurés avec le Mocap et ceux mesurés avec les IMUs, ainsi que la comparaison des différents paramètres calculés à partir ces signaux (présentés en partie 2.2 . La deuxième partie présente les résultats de l'analyse statistique sur ces paramètres.

3.1 Comparaison IMUs vs. MoCap

L'outil développé a été comparé à deux niveaux : tout d'abord en comparant les méthodes de mesures (MoCap et IMUs) à l'aide des graphes de Bland-Altman comparant la concordance entre les deux méthodes de mesure. Puis de manière plus spécifique, en comparant les valeurs des paramètres récupérés à chaque foulée.

La comparaison des signaux de déplacements verticaux de la tête, du garrot et de la croupe sont présentés en Figure 5 pour un cheval au trot à 4m/s.

Figure 5 : comparaison des signaux de déplacements verticaux de la tête (gauche), du garrot (milieu) et de la croupe (droite) obtenus avec le MoCap (courbe rouge) et les capteurs IMU (courbe bleu) pour un cheval au trot à 4m/s



On peut voir sur ces graphes que les différences entre les deux signaux se retrouvent principalement aux extrema (minima et maxima de courbes), ce qui se retrouve aussi sur les graphiques de Bland-Altman (Figure 6). Le graphe de Bland-Altman représente en abscisse la moyenne de la mesure MoCap et de la mesure IMU pour chaque point du signal et en ordonnée la différence entre la mesure MoCap et la mesure IMU, donc le biais entre ces deux méthodes. La ligne en pointillés centrale correspond au biais moyen et les deux autres correspondent aux bornes de l'intervalle de confiance à 95%.

Les valeurs des biais moyens, des bornes supérieure et inférieure de l'intervalle de confiance sont présentées dans le Tableau 1. Pour chaque signal de Tête, Garrot et Croupe, le biais moyen est proche de 0 et les intervalles de confiance sont inférieures à ± 5 mm, ce qui montre une bonne concordance entre les deux méthodes de mesure.

Figure 6 : Graphiques de Bland-Altman comparant les méthodes de mesures MoCap et IMU pour la Tête, le Garrot et la Croupe pour un cheval aux deux vitesses

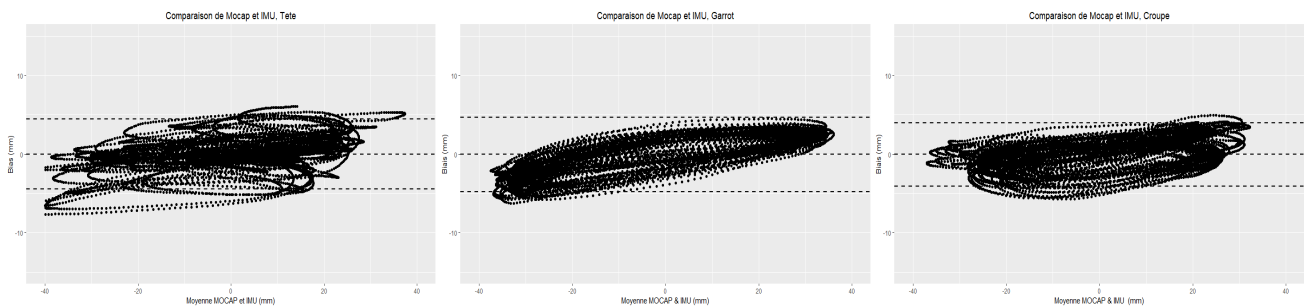
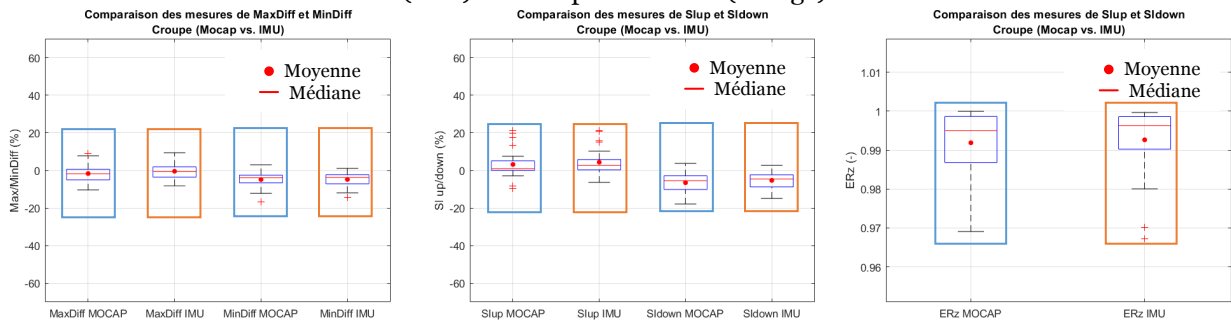


Tableau 1 : biais, limites supérieures et inférieures pour les graphiques de Bland-Altman pour la Tête, le Garrot et la Croupe

	Tête	Garrot	Croupe
Biais	-0,002	-0,048	-0,056
Intervalle supérieur	4,478	4,679	3,957
Intervalle inférieur	-4,482	-4,775	-4,070

Les paramètres extraits pour cette étude sont calculés à partir des extrema de courbe. Pour vérifier que les erreurs constatées précédemment n'influent pas sur les paramètres calculés, une comparaison est aussi effectuée en Figure 7. Les graphiques suivants représentent la distribution des valeurs des différents paramètres issus de chaque méthode de mesure pour le capteur croupe uniquement, pour un cheval à 4m/s. Une première comparaison des moyennes et médianes montrent que les résultats sont proches. Ce constat est aussi fait pour les paramètres des autres chevaux et aux autres vitesses.

Figure 7 : Comparaison des valeurs des paramètres extraits pour la croupe: MaxDiff et MinDiff (gauche), SIup et SIdown (milieu) et ERz (droite). Les paramètres ont été extraits des courbes obtenues avec le MoCap (bleu) et les capteurs IMUs (orange)



3.2 Effet de la vitesse : résultats statistiques

Les résultats des tests statistiques sont les suivants, avec les codes de significativité : p-value comprise entre 0,05 et 0,001 : “ * ”, p-value inférieure à 0,001 : “ ** ”

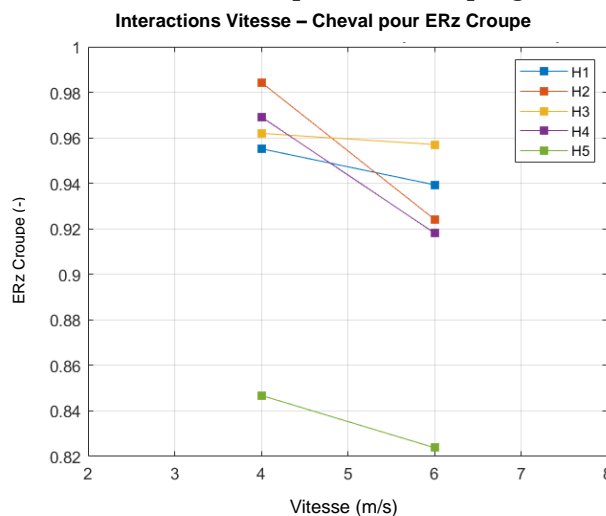
Tableau 2 : résultats statistiques pour les paramètres Tête, Garrot et Croupe

	Tête				Garrot					Croupe				
	MinDiff	MaxDiff	SIup	SIdown	MinDiff	MaxDiff	SIup	SIdown	ERz	MinDiff	MaxDiff	SIup	SIdown	ERz
Vitesse	**	**	**	**	*	**	**	**	**	**	**	*	**	**
Cheval	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
Vitesse-Cheval	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**

Dans le cadre de notre étude, les hypothèses 2 et 3 sont validées pour tous les paramètres tandis que l’hypothèse 1 est validée pour tous les paramètres sauf SIdown et ERz Garrot, ainsi que pour MaxDiff Croupe. Le test statistique montre donc que sur notre population de 5 chevaux et aux 2 vitesses testées, des paramètres peuvent être significativement influencés par la vitesse pour certains chevaux (interaction cheval-vitesse significative). L’effet de la vitesse sur le paramètre mesuré est donc individu dépendant, effet que l’on peut observer à la Figure 8. Cela peut venir de différents facteurs non pris en compte dans l’analyse comme la hauteur au garrot du cheval, son niveau d’entraînement, la présence éventuelle d’une boiterie et sa caractérisation, etc.

On peut voir par exemple sur la Figure 8 que les chevaux H4 présentent une diminution significative du paramètre ERz Croupe ($p < 0.001$) avec l’augmentation de la vitesse, tandis que les chevaux H1, H3 et H4 ne présentent pas de différence significative de ce paramètre avec l’augmentation de la vitesse.

Figure 8 : graphiques d’interactions Vitesse-Cheval pour ERz Croupe (gauche) et MaxDiff Garrot (droite).



4 Applications pratiques et perspectives

4.1 Applications pratiques

L'outil développé par le CWD-VetLab a pour vocation d'être utilisé dans au moins deux cas de figure.

Le premier est la recherche sur la locomotion du cheval. Les capteurs utilisés permettent de s'affranchir des limites posées par les systèmes de mesure de capture de mouvement 3D optique. Ils peuvent être utilisés en intérieur comme en extérieur, à toutes les allures, à toutes les vitesses et ne sont pas limités dans l'espace. L'outil est d'ailleurs actuellement utilisé pour un projet de recherche sur la locomotion du cheval sur tapis roulant immergé (C. Moiroud *et al.*, 2018).

Le second cas est l'usage par les vétérinaires. Lors d'un examen locomoteur, le vétérinaire comparera les résultats obtenus pour différentes conditions d'examen (ligne droite, cercle, différents tests) lors desquelles le cheval peut se déplacer à différentes vitesses. Notre étude a montré que pour nos 5 chevaux, la majorité des paramètres extraits est significativement influencée par la vitesse. Il peut donc être nécessaire de la prendre en compte dans l'interprétation des résultats. Nos résultats ne concernant que les 5 chevaux de l'étude, ils ne peuvent pas être directement généralisés. Il conviendra donc d'effectuer d'autres mesures sur d'autres chevaux avec des profils différents (hauteur au garrot, race, niveau d'entraînement et discipline pratiquée, présence de boiterie...) afin d'obtenir une base de données suffisante à analyser avec un modèle mixte pour ensuite pouvoir généraliser à la population entière.

Suite à cette seconde étude et si l'effet significatif de la vitesse est confirmé, plusieurs solutions sont envisagées pour faciliter l'interprétation des résultats. La première possibilité est d'intégrer un module GPS à l'outil qui sera capable de fournir la vitesse du cheval et donc de normaliser les valeurs des paramètres. Les GPS ne fournissant pas la vitesse pour chaque foulée et étant limités à un usage en extérieur, cette solution ne semble pas être la plus adéquate.

La deuxième solution serait de normaliser les paramètres par la fréquence de foulée. Cette dernière est directement liée à la vitesse du cheval et peut être récupérée facilement à partir des données des capteurs uniquement. Une fois les paramètres normalisés par la fréquence de foulée, il nous faudra faire une nouvelle analyse statistique pour vérifier que l'effet de la vitesse est réduit voire annulé. Cette solution est la plus simple à mettre en place et ne nécessiterait pas de mesures supplémentaires. La vitesse est cependant également influencée par la longueur de foulée, qui n'est pas mesurée par l'outil.

La deuxième solution envisagée serait d'adapter un modèle statistique permettant d'estimer la vitesse de chaque foulée du cheval (Schmutz *et al.* 2018). Ce modèle est déjà utilisé pour les foulées de galop sur cheval monté. Afin de l'adapter à l'application de notre système, il faudra récolter un grand nombre de données au trot dans différentes conditions (ligne droite, cercle aux deux mains, différents types de sol et différentes vitesses) avec différents chevaux pour pouvoir fournir au modèle des signaux de références à vitesses connues. L'utilisation de cette solution nécessiterait donc une campagne de mesures conséquente, incluant chevaux sains et chevaux boiteux afin d'obtenir une précision suffisante. L'avantage est que la vitesse du cheval pourra être estimée, notamment pour les conditions sur cercle et en intérieur.

4.2 Perspectives

A court terme, l'outil sera déployé au Cirale afin de l'inclure dans la plupart des examens locomoteurs. Il continuera d'être utilisé dans les différents projets de recherche du CWD-VetLab.

De nouveaux paramètres seront aussi ajoutés, comme le ratio de phase d'appui/foulée pour chaque membre ainsi que les angles de protraction et retraction au début et à la fin de la phase d'appui. Ces paramètres permettront de mieux caractériser la locomotion des chevaux lors des examens.

5 Remerciements

Les auteurs remercient les cliniciens du Cirale pour la mise à disposition des chevaux et du tapis roulant, ainsi que le LabCom « CWD-VetLab » pour son soutien financier. Le « CWD-VetLab » est financé par l'Agence Nationale de la Recherche (contrat ANR 16-LCV2-0002-01).

6 Références

Audigié, F., Pourcelot, P., Degueurce, C., Geiger, D., & Denoix, J. (2002). Fourier analysis of trunk displacements: a method to identify the lame limb in trotting horses. *Journal of Biomechanics*, 1173-82.

Clayton, H. (1994). Comparison of the strides kinematics of the collected, working, medium and extended trot in horses. *Equine Veterinary Journal*, 230-4.

- Galisteo, A., Cano, M., Morales, J., Vivo, J., & Miro, F. (1998). The influence of speed and height at the withers on the kinematics of sound horses at the hand-led trot. *Veterinary Research Communications*, 415-23.
- Moiroud, C., Jacquet, S., Parmentier, J., Sapone, M., Martin, P., Chateau, H., . . . Denoix, J. (2018, Novembre). Influence de la hauteur d'eau et de la vitesse sur la locomotion du cheval au pas et au trot sur un tapis roulant immergé. *46ème Journées Annuelles de l'AVEF*. Bordeaux.
- Pfau, T., Stubbs, N., Kaiser, L., Brown, L., & Clayton, H. (2012). Effect of trotting speed and circle radius on movement symmetry in horse during lunging on a soft surface. *American Journal of Veterinary Research*, 1890-9.
- Schmutz, A., Jacques, J., Bouveyron, C., Cheze, L., & Martin, P. (2018). Clustering of multivariate functional data, a new methodology. *Advances in Functional Data Analysis*. Rennes.
- Walker, A., Wilson, A., & Pfau, T. (2010). Comparison of kinematic symmetry index calculations and the effects of straight and circular trotting. *Equine Veterinary Journal Suppl.*, 482-7.
- Weishaupt, M., Wiestner, T., Hogg, H., Jordan, P., Auer, J., & Barrey, E. (2001). Assessment of gait irregularities in the horse : eye vs gait analysis. *Equine Veterinary Journal Suppl* 33, 135-140.